引用格式：郑崇伟, 李崇银. 海上风能等级区划研究：瓶颈与对策. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 654-665.

Zheng C W, Li C Y. Research on offshore wind energy classification: Bottlenecks and countermeasures. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 654-665

海上风能等级区划研究：瓶颈与对策

郑崇伟[1,2]　李崇银[2*]

1 海军大连舰艇学院　大连　116018

2 中国科学院大气物理研究所　大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室　北京　100029

摘要　海上风能等新能源是实现碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）目标的重要支撑，其资源合理等级区划是资源布局和选址的关键依据。文章首先梳理国内外海上风能等级区划的研究进展，剖析传统区划方案需要改进的6个方面：未能兼顾环境风险和成本效益，资源等级的区域差异不显著，难以满足多样化开发需求，在部分月份不适用，对未来风能等级预估不足，区划结果与机理不符。针对上述问题，采用气候统计方法，提出全要素、全时节、全海域、动态自适应的风能等级区划理念，以及绘制风能等级动态图谱的应对措施，以解决资源开发的宏观战略布局、微观精准选址、长期科学规划难题。期望本研究可以推动海上风能的产业化、规模化、自主化的高质量建设，助力我国“双碳”目标实质化、深层化。

关键词　双碳，海上风能，风能等级区划，宏观战略布局，微观精准选址

“海洋命运共同体”“21世纪海上丝绸之路”是为全人类谋福祉的宏伟倡议，在推进过程中能源领域重要性凸显[1]，是海洋高质量建设的重要方面。如何应对愈发严峻的资源危机已成为全人类共同的责任。2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中指出，“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。2021年9月，在第七十六届联合国大会一般性辩论上的讲话中指出，“中国将大力支持发展中国家能源绿色低碳发展，不再新建境外煤电项目”。党的二十大报告强调“确保能源安全”“加快规划建设新型能源体系”。2022年，国家发展和改革委员会联合多部委印发《关于推进共建“一带一路”绿色发展的意见》《“十四五”可再生能源发展规划》，强调新能源开发。海上风能具有可再生、储量大、分布广等诸多优点，主要用于海上风力发电（简称“风电”），可为边远海岛、海洋牧场等供电。海上风电是突破能源危机的重要途径，是推动互联互通和展开国际合作的良好契机，也是实现碳达峰、碳中和（以

*通信作者

修改稿收到日期：2023年3月22日

下简称“双碳”）目标的重要支撑，具有一点突破、多极利好的现实意义。

掌握资源特征是高效展开海上风电布局的前提，但资源评估领域一直被欧美主导，不利于我国自主高质量发展。国际上，海上风能评估大体经历了4个阶段：① 有限观测资料阶段。Archer和Jacobson[2]利用测站资料计算了全球近岸风能，但无观测资料海域难以展开风能评估。② 卫星观测资料阶段。遥感技术使得大范围资源评估得以实现。张秀芝和徐经纬[3]利用卫星资料计算了中国近海风功率密度（WPD）。③ 数值模拟阶段。数值模拟使得无观测资料海域的风能评估得以实现。周荣卫等[4]利用MM5/Calmet模式对我国近海的风能展开了模拟分析，取得很好成果。④ 多资料融合阶段。朱蓉等[5]利用风能数据和测风塔数据，详查了我国陆地和近海的风能，对于资源开发具有重要价值。

前人在资源时空特征分析方面作了大量贡献，但在海上风电的布局和选址方面仍面临瓶颈。合理的资源等级区划是“双碳”目标下海洋新能源宏观布局的决策的依据，是海上风电精准选址的核心所在。但传统的风能等级区划方案只考虑了资源特征，未兼顾环境风险和成本效益，且区划结果固定不变，导致出现资源等级区域差异不显著、难以满足多样化任务需求、部分月份不适用等一系列问题。以应对上述问题为牵引，本文首先梳理国内外海上风能等级区划的研究进展，剖析传统方案需要改进的地方，最后提出对策建议，以期推动海上风电的产业化、规模化，助力“双碳”目标实现。

1 海上风能等级区划研究进展

根据风能等级区划方案考虑要素的完善程度，国内外的海上风能等级区划主要划分为3个阶段——初期探索阶段、中期发展阶段和相对成熟阶段。各阶段取得的主要成果、优势与不足总结如下。

1.1 初级探索阶段

1981年，世界气象组织发表了全球风能分布图[6]，按WPD和风速将风能分为10个等级。1986年，美国能源部（DOE）根据WPD和风速将风能划分为7个等级（表1）①。2005年，美国国家可再生能源实验室（NREL）根据WPD对全球海上风能展开了区划②，发现南北半球西风带属于最优的7级风能，中低纬海域为4—6级风能。相关研究主要依据WPD分别对中国广东近海、辽宁沿海、连云港近海，以及巴基斯坦东南部、中国东部海域、中国近海的风能展开了区划，对于海上风能开发起到了重要推动作用[7-12]。整体来看，早期风能等级区划采用的指标比较单一，主要考虑WPD和风速。

1.2 中期发展阶段

随着评估能力提升，在风能等级区划时可以考虑更多指标。朱瑞兆和薛桁[13]、陈千盛[14]考虑WPD、有效风力时数、极值风速，分别展开了我国陆地、福建沿海的风能等级区划。国家发展和改革委员会曾提出一套风能等级区划方案[15]，上述工作为国家风能宏观布局提供了支撑。2012年，Zheng等[16]综合DOE和NDRC的风能等级区划方案[15,17,18]（表2），展开了中国海域风能等级区划。2014年，Zheng和Pan[19]利用表2的方案，展开了全球海上风能等级区划（图1），为海上风电的宏观布局提供了参考。与美国国家可再生能源实验室（NREL）②根据单一的WPD展开风能等级区划相比，Zheng和Pan[19]在全球海上风能等级区划时考虑了风速、WPD、有效风力时数3个指标。2015年，栗冬慧[20]依据WPD、有效风力时数展开了中

① Department of Energy (DOE) of the United States. Wind energy resource atlas of the United States. (1987-03-01)[2022-08-01]. https://www.nrc.gov/docs/ML0609/ML060940383.pdf.

② National Renewable Energy Laboratory (NREL). QuikSCAT annual wind power density at 10 m. (2005-10-19)[2022-08-01]. https://openei.org/w/index.php?title=File:QuikSCAT-_Annual_Wind_Power_Density_at_10m.pdf&page=1S;%202005.

表1　美国能源部的风能等级区划方案①

Table 1　Wind energy classification scheme of DOE①

风能等级	10 m 高度		50 m 高度	
	风功率密度（W/m²）	风速（m/s）	风功率密度（W/m²）	风速（m/s）
1	0—100	0—4.4	0—200	0—5.6
2	100—150	4.4—5.1	200—300	5.6—6.4
3	150—200	5.1—5.6	300—400	6.4—7.0
4	200—250	5.6—6.0	400—500	7.0—7.5
5	250—300	6.0—6.4	500—600	7.5—8.0
6	300—400	6.4—7.0	600—800	8.0—8.8
7	400—1 000	7.0—9.4	800—2 000	8.8—11.9

表2　2012年Zheng 等[16]综合国家发展和改革委员会和美国能源部方案得到的风能等级区划方案[15,17,18]

Table 2　Wind energy classification scheme obtained by Zheng et al.[16] by comprehensively considering the methods from DOE and NDRC[15,17,18]

风能等级	年平均风速（m/s）	年平均风功率密度（W/m²）		有效时数（h）	丰富程度
		方法1	方法2		
1	0.0—4.4	<100	<50	<2 000	贫乏区
2	4.4—5.1	100—150	50—150	2 000—3 000	可利用区
3	5.1—5.6	150—200	150—200	3 000—5 000	较丰富区
4	5.6—6.0	200—250	200—250	>5 000	丰富区
5	6.0—6.4	250—300	250—300		
6	6.4—7.0	300—400	300—400		
7	7.0—9.4	400—1 000	400—1 000		

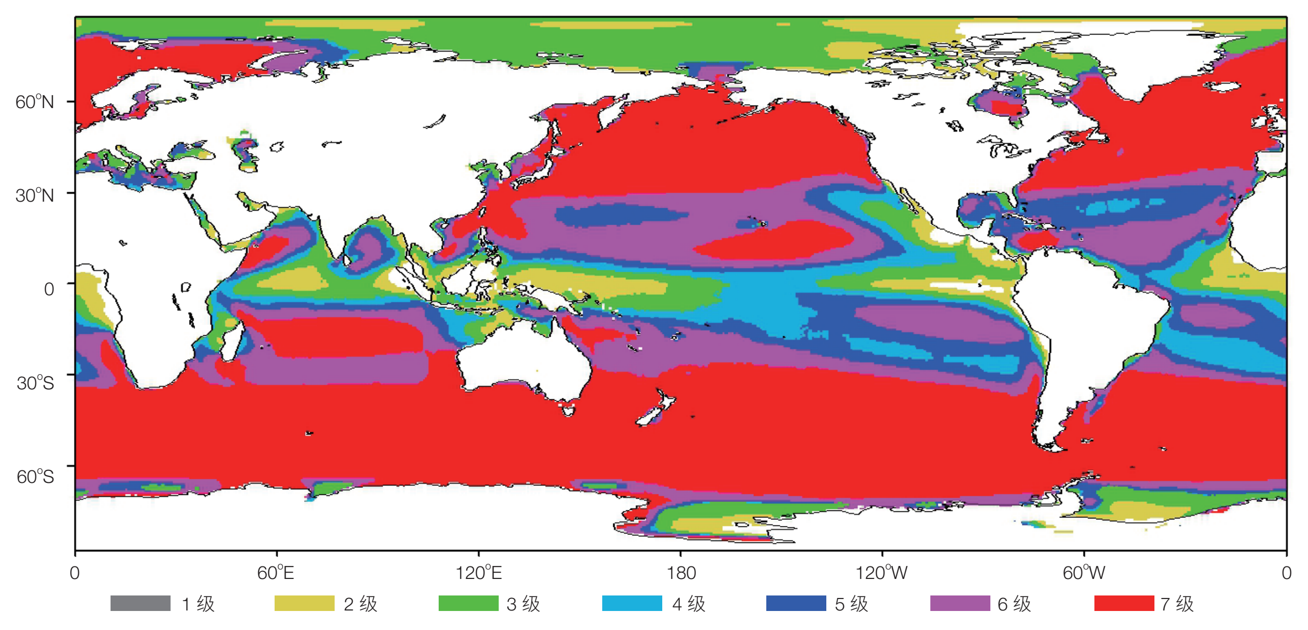


图 1　2014 年 Zheng 和 Pan[19] 利用本文表 2 方案得到的全球海域风能等级区划图

Figure 1　Classification of global offshore wind energy produced by Zheng and Pan in 2014 by using scheme in Table 2 [19]

国海域风能等级区划。2017 年，Zheng 等[21]提出全时节风能等级区划新理念（各月的风能等级区划），并以全球海域作为实例研究。

1.3 相对成熟阶段

随着风能可利用率和能级频率被定义[16,22,23]，这两个关键指标被应用于风能等级区划。2018 年，Zheng 等[24]利用 Delphi 法，构建了一套能兼顾资源特征、环境风险、成本效益的风能等级区划方案（表 3）。技术路线为：① 要素选取。包括 WPD、有效风速频率（EWSO）、富集率（RLO）、水深（WD）、离岸距离（DC）、极值风速（EWS）、变异系数（Cv）、月变化指数（Mv）8 个关键要素。② 要素的标准化处理。利用风场、水深、海岸线数据，计算得到 WPD、EWSO、RLO、WD、DC、EWS、Cv、Mv，采用极差变换法将上述要素标准化处理。③ 权重评估。邀请资源评估领域的知名专家评估各要素在风能开发中的权重。④ 风能等级区划。基于各要素的权重和标准化后的数值，计算得到风能等级期望值，将其划分为 7 个等级（表 3），从而实现风能等级区划（图 2）。与传统的风能等级区划结果相比[19]②，新方案实现了风能资源要素的充分考虑，在展现风能等级的区域差异方面得到显著提升。

为了对比传统和新风能等级区划方案，将图 1 和图 2 中的印度洋 20°S—13°S 海域的区划结果放大（图 3）。发现两者存在明显差异：该海域在新方案中属于 4 级风能（图 3a），而在 Zheng 和 Pan[19]的传统方案中则属于 7 级风能（图 3b），在 NREL②的传统方案中也属于 7 级风能。究竟哪个方案更合理？从“三风四带”分布特征来看，该海域属于东南信风带，为风速相对大值区。但该海域的风力强度远远无法与南半球西风带相比。显然，传统方案将印度洋 20°S—13°S 海域和南半球西风带海域共同划为最高的 7 级风能并不合理，Zheng 等的新方案[24]更符合机理。

在优化了全球海域风能宏观区划后，Zheng 等[25]提出微观资源等级区划的理念，并以新西兰海域作为实例（图 4a），解决了如何展现资源等级区域差异的难题。Zheng 等[25,26]指出先期的风能等级区划属于常规区划，难以满足多样化开发需求，为此提出了动态自适应风能等级区划的理念，被国内外同行大量采用[27-38]。主要设定了商业开发（关注成本）、应急供电（关注可利用率）、用电量巨大（关注资源丰富程度）3 种情景，根据需求差异合理对各要素权重进行调整，展开了不同需求下的风能等级区划，并以新西兰海域为实例（图 4b—d）。发现不同需求下，风能等级的空间分布表现出明显差异。2019 年，Zheng 等[22]指出不仅需要分析过去的资源特征，更需

表3　2018 年 Zheng 等[24]设计的风能等级区划方案

Table 3　Wind energy classification scheme designed by Zheng et al. in 2018 [24]

等级	风能等级期望值（y）	资源潜力	丰富程度
1	$y \le 0.4$	Poor（贫乏）	贫乏区
2	$0.4 < y \le 0.5$	Marginal（临界）	可用区
3	$0.5 < y \le 0.6$	Fair（一般）	较富集区
4	$0.6 < y \le 0.7$	Good（好）	富集区
5	$0.7 < y \le 0.8$	Excellent（优秀）	富集区
6	$0.8 < y \le 0.9$	Outstanding（突出）	富集区
7	$y > 0.9$	Superb（极好）	富集区

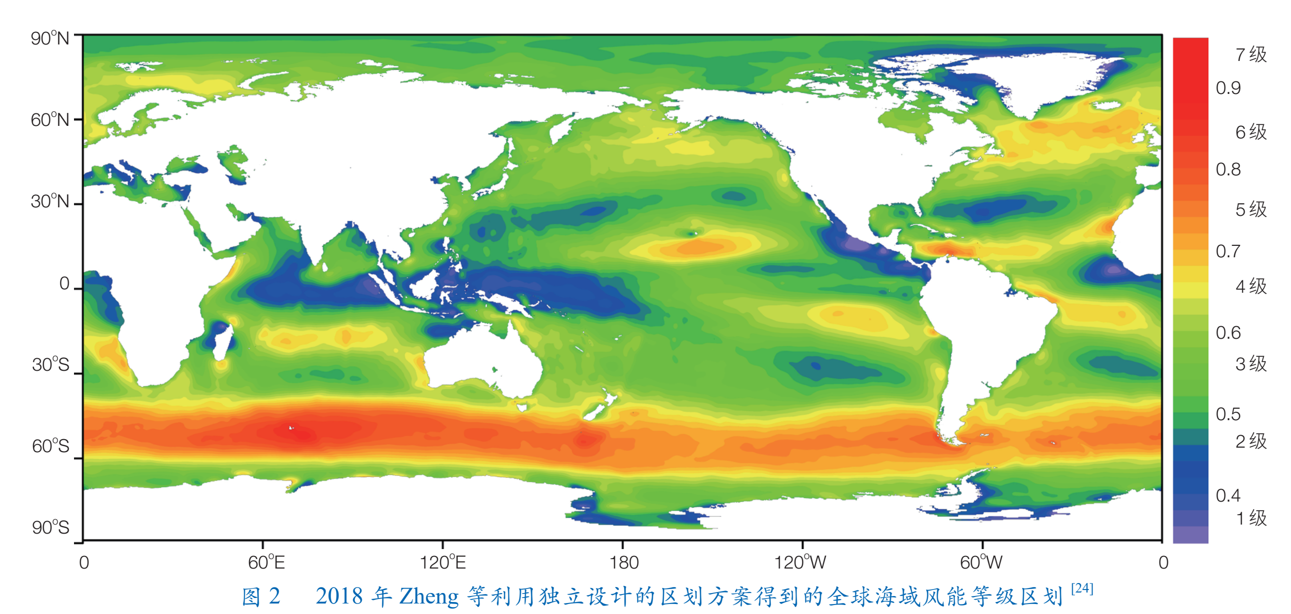


图 2　2018 年 Zheng 等利用独立设计的区划方案得到的全球海域风能等级区划 [24]

Figure 2　Global offshore wind energy classification produced by Zheng et al. in 2018 by using a set of scheme which is independently designed [24]

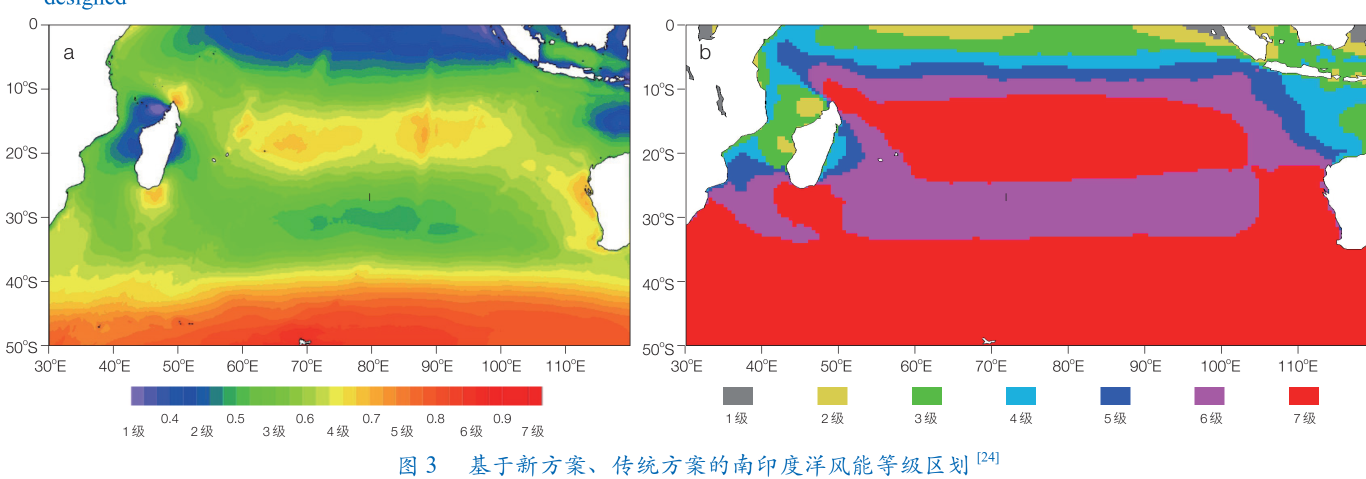


图 3　基于新方案、传统方案的南印度洋风能等级区划 [24]

Figure 3　Wind energy classification obtained from traditional and new classification schemes in the southern Indian Ocean [24]

（a）新风能等级区划方案；（b）传统风能等级区划方案

(a) New energy classification scheme; (b) Traditional energy classification scheme

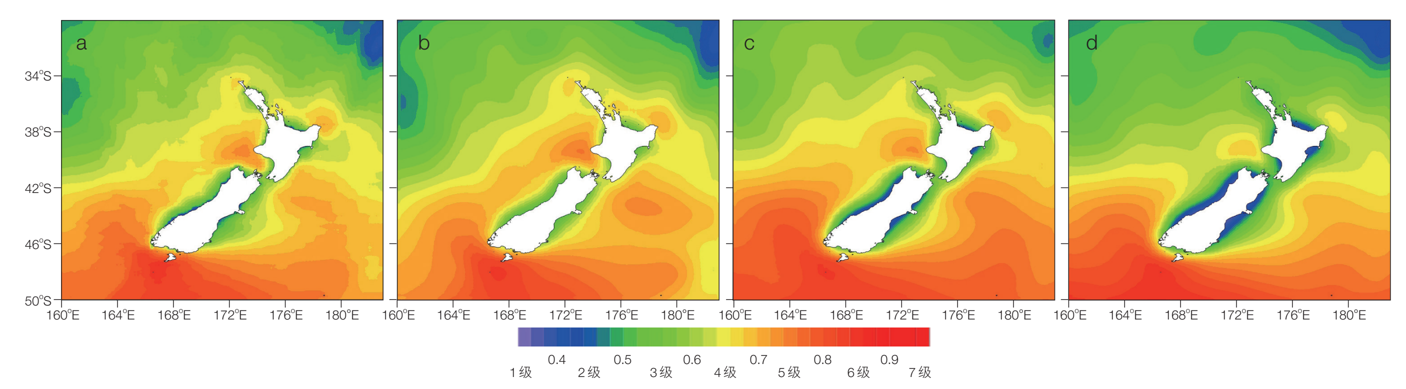


图 4　不同需求下的新西兰周边海域风能等级区划 [27]

Figure 4　Wind energy classification under different demand of New Zealand waters [27]

（a）常规需求；（b）商业开发；（c）应急供电；（d）用电量巨大

(a) Common demand; (b) Commercial development; (c) Emergency power supply; (d) Huge power consumption

要关注未来的资源，并展开了不同排放情景下全球海域未来的风能等级区划。

2 海上风能等级区划研究问题分析

（1）未能兼顾资源、风险、成本，制约宏观战略布局。长久以来，美国DOE的风能等级区划方案比较通用，对海上风能开发利用起到了促进作用。但该方案只考虑了部分资源特征（WPD、风速、有效风力时数），关系到风能采集效率和产出的稳定性、能级频率等关键指标都尚未考虑，不利于提升资源采集和转换效率。而传统风能等级区划方案主要是考虑资源特征，未能兼顾环境风险，尤其是极端天气、国际冲突等自然环境与社会环境风险，制约能源风险应对能力。另外，在传统方案中，水深、离岸距离等密切关系到风能开发成本的要素也没能充分考虑，不利于降低建设成本。这些因素导致传统风能等级区划方案在提高采集效率、保障建设安全、扩大投资效益方面受限。

（2）资源等级的区域差异不显著，制约微观精准选址。在风能开发的宏观选址确定后，最终的资源开发需要落实到具体海域。但现有的风能等级区划多是宏观区划，资源等级的区域差异不显著。NREL②以及Zheng和Pan[19]利用传统的风能区划方案，分别展开了全球海域的风能等级区划。结果表明，南北半球西风带大范围海域属于最优的7级风能，难以为西风带海域的风电场微观选址提供参考；中低纬度大范围海域属于4—6级风能，难以为中低纬海域的风电场微观精准选址提供参考；中国南海大部分区域属于6—7级风能、孟加拉湾大范围海域为6级风能、长江口-珠江口海域为7级风能，区划结果也难以为上述海域的风电场的风能设施精准选址提供有效依据，这就对关注海域的资源微观区划提出了迫切需求。

（3）区划结果不具普适性，限制多样化开发。在实际的风能等级区划时，不同需求对各要素的关注程度截然不同。例如，对于商业开发，更关注与并网难度和投资成本密切相关的水深和离岸距离，以降低成本。对于岛礁供电，尤为重视资源可利用率，以尽可能提升岛礁电力自给自足能力。对于用电量巨大的深远海工程，更关注与资源丰富程度密切相关的WPD、RLO。而在传统风能等级区划方案中，各指标的权重固定不变，导致区划结果不具普适性，难以满足多样化的海上风能开发需求，甚至误导风能开发的选址设计。

（4）在部分月份不适用，限制全时节开发。传统风能等级区划展开的是全年等级区划。针对常年布放的风能装置，全年的风能等级区划结果具有较好的参考价值。但有的任务只在部分月份展开，这种情况下全年的风能等级区划结果则不具有指导价值。例如，从全年风能等级区划结果来看，南海大部分区域属于风能富集区，这主要是由该海域夏季强劲的西南风和冬季强劲的东北风贡献的，而春秋属于季风过渡季节，风力较弱。如果以全年的风能等级区划结果来指导南海春秋季节的风能开发，则会出现较大偏差。因此，有必要对各月的资源展开区划，以满足全时节资源开发的布局和选址需求。

（5）对未来的风能等级区划预估不足，制约长期规划布局。现有工作主要是对过去的风能展开等级区划，对未来风能展开等级区划的工作几近空白，不利于风能资源开发的长期规划布局。利用历史风场数据，可以展开过去的风能等级区划，为当前的风能开发选址提供参考；利用未来风场数据（如联合国政府间气候变化专门委员会提供的未来百年国际耦合模式比较计划风场），可以展开未来的风能等级区划，为风能开发的长远选址布局提供参考依据。将历史等级区划结果和未来等级区划结果结合使用，可得到风能等级优势区域的分布和变迁，更好地支撑风能开发的长期规划布局。

（6）部分区划结果与机理不符，导致选址依据

不准确。利用传统方案展开的全球海上风能等级区划表明[19]②：印度洋30°S—35°S海域属于6—7级风能，资源等级优越。而相对成熟阶段的动态自适应风能区划结果表明该海域是2—3级风能[24]，属于相对劣势区域。哪个方案更符合物理机制？从“三风四带”来看，该海域处于南半球西风带和东南信风带之间的过渡带，风速较小。显然，传统方案高估了该海域的风能等级，与物理机制不符。又如，印度洋20°S—13°S海域在传统风能等级区划中属于最高的7级风能[19]②。而相对成熟阶段的区划结果中该海域属于4级风能[24]。印度洋20°S—13°S海域属于东南信风带，虽然处于风速相对大值区，但该区域的风力强度远远无法与南半球西风带相提并论。因此，传统方案将印度洋20°S—13°S海域和南半球西风带海域共同划为风能最高等级并不合理。

3 对策建议

如何优化与促进海上风能等级区划研究，更好地推动海上风能产业化、规模化，需要从技术和理论层面解决海上风能开发的宏观战略布局、微观精准选址、长期科学规划难题，从机构和学科建设与国家品牌建设等方面加强工作。

3.1 技术和理论突破

（1）突破技术瓶颈，支撑布局选址。为解决传统风能等级区划面临的上述6个问题，基于动态自适应风能等级区划[25,26]，本文进一步提出全要素、全时节、全海域、动态自适应的风能等级区划理念。① 全要素，即风能等级区划需要兼顾资源特征、环境风险、成本效益，解决传统方案容易遗漏关键要素的问题。② 全时节，即风能等级区划需要包括全年和各月、历史和未来的资源区划，解决传统方案在部分月份不适用、对未来预估不足的问题。③ 全海域，即风能等级区划既要覆盖全球海域，也要满足局部关键海域的资源等级区划，解决传统方案难以展现资源等级区域差异的难题。④ 动态自适应，即风能等级区划方案需要能够满足商业开发、应急供电等多样化开发需求，解决传统方案不具普适性的难题。

（2）提高理论储备，引导行业标准。未来有必要利用全要素、全时节、全海域、动态自适应的风能等级区划方案，展开全球海域及局部关键海域、不同需求下、全时节（全年和各个月份、历史状态、未来不同排放情景）的海上风能宏观/微观等级区划，并绘制全球海域风能等级动态图谱，为海上风能开发的宏观战略布局、微观精准选址、长期科学规划提供理论储备、决策支持。该方案（图5）同样为波浪能、温差能、海流能等海洋新能源的等级区划提供了技术途径。未来同样有必要推动该方案建设成为资源等级区划领域的国家标准、国际标准，提升国际话语权。

3.2 机构和学科建设

（1）创建协同中心，支撑国家布局。目前关于“21世纪海上丝绸之路”海上风能的研究丰富，但整体多而不精、广而不深、体系性弱[39]。建议打造国家

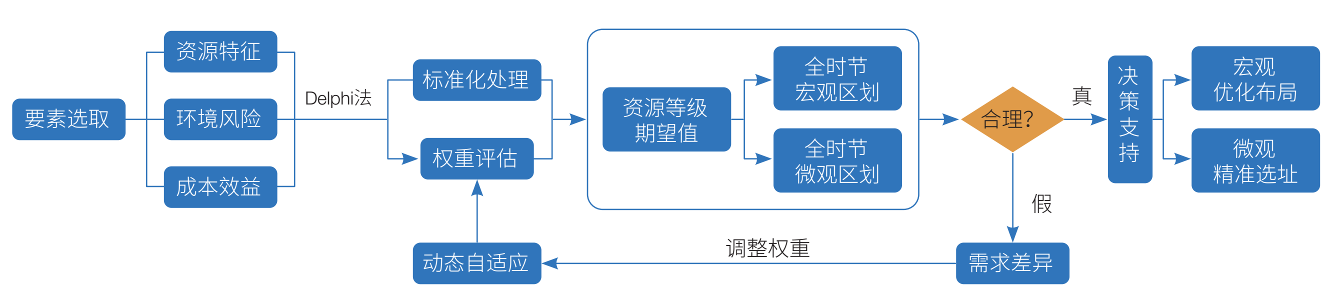


图5　动态自适应资源区划流程图

Figure 5　Flow chart of dynamic self-adjusting classification

级“21世纪海上丝绸之路”新能源协同中心，整合多方资源，形成合力突破新能源研究面临的宏观战略布局、微观精准选址、短期精准预报、长期科学预估、环境风险规避、新能源应用大数据建设等瓶颈，打破“小作坊”式研究现状，从根源上解决小、散、多的现象，提升为国家新能源布局解决实际问题、提供决策支持的能力。

（2）创建学科集群，创新人才培养。“海洋命运共同体”等倡议面临的一系列瓶颈，归根结底是学科建设、人才培养的问题。建议创建国家倡议需求下的学科集群（如“海洋命运共同体”学科集群），聚焦海洋新能源开发、风险监测预警、新能源大数据建设等前沿交叉领域，开设国家倡议主题课程。提出“硕博化开展本科教育”跨越式人才培养理念，缩短培养周期，提高培养质量。着力培养海洋新能源尖端专业人才、具有综合专业素养的智库人才。以前沿学科集群为支撑，创新人才队伍为根本，支撑国家倡议高质量建设。

3.3 国家品牌建设

（1）发布能源数据，展现大国担当。海洋大数据是综合国力的重要标志，但该领域始终被欧洲中期天气预报中心（ECMWF）等欧美机构主导。例如，在海浪统计分析时，ECMWF整合分析的数据集（ERA5、ERA-Interim）等资料比较通用，但却来自欧美。欧美提供的海洋大数据多为原始数据，存在体量大、信息密度低的弱点。科学地从海量原始数据中提取关键信息，建立应用大数据，是实现海洋高质量建设的核心所在，也是欧美亟待攻克的难题。建议我国大力推动海洋应用大数据建设，探寻弯道超车突破口。Zheng等[40,41]创建的“21世纪海上丝绸之路”新能源大数据得到国际同行认可和应用，为我国海洋大数据弯道超车提供了新思路。

（2）推动国家品牌，重塑国际话语。建议通过创立国际奖项、创办专业期刊、主持领域专刊等措施，重塑海洋新能源领域的国际话语体系，并促进“海洋命运共同体”“21世纪海上丝绸之路”等国家品牌。创立以国家倡议为主题的国际奖项（如“海洋命运共同体”国际新能源奖），打破国际奖项的设置、评审被国外主导的传统。创办以国家倡议为主题的峰会，不断凝聚国际共识与支持。Zheng等[21,22,24,26]推出了以“21世纪海上丝绸之路”为主题的新能源大数据1套、英文丛书1套、主旨报告/专题讲座16场、专题研究3期、主持专刊5期（其中3期为SCI期刊），带动了大量国内外专家为国家倡议贡献智慧和力量，为本建议提供了技术途径。

4 结论与展望

俄乌冲突、全球气候异常等导致的能源危机，给国家能源安全提出了警示。海上风能等海洋能将是突破能源危机、实现“双碳”目标的重要支撑。但为何装备先进的欧洲国家难以依靠海洋能度过能源危机，根源在于其海洋能战略规划时未能考虑国际环境风险影响和极端天气威胁等因素。整体来看，全要素、全时节、全海域、动态自适应的风能等级区划方案风能等级区划具有以下优势：① 兼顾资源特征、环境风险（含自然环境和社会环境风险）、成本效益；② 可充分展现资源等级的区域差异；③ 满足多样化开发需求；④ 全时节适用；⑤ 实现了未来风能等级区划；⑥ 与物理机制吻合。解决了传统风能等级区划方案面临的6个难题，有利于增强能源风险抵御能力，可为海上风能开发的宏观战略布局、微观精准选址、长期科学规划等提供科技支撑、决策支持，也为波浪能、温差能、海流能等海洋新能源的布局和选址提供了技术途径。

未来有必要参考本文提出的新风能等级区划方案，展开全球海域（或关键海域）、不同需求下、全时节（全年和各个月份、历史状态、未来不同排放情景）的海上风能宏观/微观等级区划，并绘制风能等

级区划动态图谱，为海洋新能源开发积累一手基础信息和理论储备，助力海上风能产业化、规模化，助力“双碳”目标，保障国家能源安全；并推动该方案建设成为海洋新能源区划领域的国家标准、国际标准，夯实国家在该领域的国际话语权。积极推动创新成果与“海上丝绸之路”沿线国家和地区共享，增强国家倡议的凝聚力、向心力。

参考文献

1 蒋瑜, 邬明权, 黄长军, 等. 2000—2019年中国海外电力项目信息数据集. 中国科学数据, 2019, 4(4): 10-17.
Jiang Y, Wu M Q, Huang C J, et al. A dataset of China's overseas power projects (2000-2019). China Scientific Data, 2019, 4(4): 10-17. (in Chinese)

2 Archer C L, Jacobson M Z. Evaluation of global wind power. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005(110): D12.

3 张秀芝, 徐经纬. 中国近海的风能资源. 风能产业, 2013, (7): 16-21.
Zhang X Z, Xu J W. Wind energy resources in the China nearshore. Wind Energy Industry, 2013, (7): 16-21. (in Chinese)

4 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉, 等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟. 资源科学，2010, 32(8): 1434-1443.
Zhou R W, He X F, Zhu R, et al. Numerical simulation of the development potential of wind energy resources over China's offshore areas. Resources Science, 2010, 32(8): 1434-1443. (in Chinese)

5 朱蓉, 王阳, 向洋, 等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究. 太阳能学报, 2021, 42(6): 409-418.
Zhu R, Wang Y, Xiang Y, et al. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 409-418. (in Chinese)

6 Elliot D L, Aspliden C I, Cherry N J. World-wide wind resource assessment// Fifth Biennial Wind Energy Conference and Workshop. Washington, DC: DOE Office of Scientific and Technical Information, 1981, 637-648.

7 毛慧琴, 宋丽莉, 黄浩辉, 等. 广东省风能资源区划研究. 自然资源学报, 2005, 20(5): 679-683.
Mao H Q, Song L L, Huang H H, et al. Study on the wind energy resource division in Guangdong Province. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 679-683. (in Chinese)

8 龚强, 于华深, 蔺娜, 等. 辽宁省风能、太阳能资源时空分布特征及其初步区划. 资源科学, 2008, 30(5): 654-661.
Gong Q, Yu H S, Lin N, et al. Temporal-Spatial Distribution and division of wind and solar energy resources in Liaoning Province. Resources Science, 2008, 30(5): 654-661. (in Chinese)

9 陈飞, 班欣, 祈欣, 等. 连云港沿海地区及近海风能资源评估. 气象科学, 2008, 28(z1): 101-106.
Chen F, Ban X, Qi X, et al. Evaluation of wind energy resource on the coastland and adjacent sea of Lianyungang. Journal of the Meteorological Sciences, 2008, 28(z1): 101-106. (in Chinese)

10 Ullah I, Chaudhry Q Z, Chipperfield A J. An evaluation of wind energy potential at Kati Bandar, Pakistan. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 856-861.

11 张华, 张学礼. 中国东部海域风能资源分析. 水利学报，2013, 44(9): 1118-1123.
Zhang H, Zhang X L. Wind energy resource analysis of East China Sea. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(9): 1118-1123. (in Chinese)

12 齐浩. 中国近海风资源气候区划. 青岛: 中国海洋大学，2015.
Qi H. The Regionalization of Wind Resource Over China Offshore. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)

13 朱瑞兆, 薛桁. 中国风能等级区划. 太阳能学报, 1983, 4(2): 123-132.
Zhu R Z，Xue H. Division of wind energy in China. Acta Energiae Solaris Sinica, 1983, 4(2): 123-132. (in Chinese)

14 陈千盛. 福建风能的区划和开发利用. 台湾海峡，1997, 16(1): 94-99.
Chen Q S. Zonation and utilization of wind energy in Fujian. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1997, 16(1): 94-99. (in Chinese)

15 国家发展和改革委员会. 全国风能资源评价技术规定. 北京: 中国标准出版社，2004.
National Development and Reform Commission. Technical Requirements for Wind Energy Resource Assessment. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)

16 Zheng C W, Zhuang H, Li X, et al. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1): 163-173.

17 Elliott D L, Holladay C G, Barchet W R, et al. Wind Energy Resource Atlas of the United States, DOE/CH 10093-4. Richland, WA: Energy Pacific Northwest Laboratory, 1987.

18 黄世成, 姜爱军, 刘聪, 等. 江苏省风能资源重新估算与分布研究. 气象科学, 2007, 27(4): 407-412.
Huang S C, Jiang A J, Liu C. Reassessment and study on distribution of wind energy resource in Jiangsu. Journal of the Meteorological Sciences, 2007, 27(4): 407-412. (in Chinese)

19 Zheng C W, Pan J. Assessment of the global ocean wind energy resource. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 382-391.

20 栗冬慧. 山东半岛蓝黄两区海域风能、波浪能资源数值评估. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Li D H. Numerical Assessment of Wind and Wave Energy Resources in The Blue and Yellow Area of Shandong Peninsula. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)

21 Zheng C W, Li C Y, Gao C Z, et al. A seasonal grade division of the global offshore wind energy resource. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(3): 109-114.

22 Zheng C W, Li X Y, Luo X, et al. Projection of future global offshore wind energy resources using CMIP data. Atmosphere Ocean, 2019, 57(2): 134-148.

23 Zheng C W, Song H, Liang F, et al. 21st Century Maritime Silk Road: Wind Energy Resource Evaluation. Heidelberg: Springer, 2021.

24 Zheng C W, Xiao Z N, Peng Y H, et al. Rezoning global offshore wind energy resources. Renewable Energy, 2018, 129: 1-11.

25 Zheng C W, Li C Y, Xu J J. Micro-scale classification of offshore wind energy resource—A case study of the New Zealand. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 133-141.

26 郑崇伟，李崇银. 关于海洋新能源选址的难点及对策建议——以波浪能为例. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 200-206.
Zheng C W, Li C Y. Overview of site selection difficulties for marine new energy power plant and suggestions: Wave energy case study. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 200-206. (in Chinese)

27 朱茳. 分布式发电项目竞争力及提升路径模型研究. 北京: 华北电力大学，2017.
Zhu J. Competitiveness Analysis and Improving Path Models for Distributed Generation Projects. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)

28 Liu J K, Gao C Y, Ren J Z, et al. Wind resource potential assessment using a long term tower measurement approach: A case study of Beijing in China. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 917-926.

29 冷疏影, 朱晟君, 李薇, 等. 从“空间”视角看海洋科学综合发展新趋势. 科学通报, 2018, 63(31): 3167-3183.
Leng S Y, Zhu S J, Li W, et al. Towards a comprehensive development of the Marine Science: A reflection from the spatial perspective. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(31): 3167-3183. (in Chinese)

30 王哲, 张韧, 葛珊珊, 等. 俄罗斯北部海域风能资源的时空特征分析. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 465-477.
Wang Z, Zhang R, Ge S S, et al. Spatial and temporal characteristics of wind energy resources in Northern Sea of Russia. Advances in Marine Science, 2018, 36(3): 465-477. (in Chinese)

31 Hu H D, Hu Z Y, Zhong K W. Long-term offshore wind power prediction using spatiotemporal kriging: A case study in China’s Guangdong Province. Energy Exploration & Exploitation, 2020, 38(3): 703-722.

32 Costoya X, de Castro M, Carvalho D, et al. On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. Applied Energy, 2020, 262: 114537.

33 Ribeiro A, Costoya X, de Castro M, et al. Assessment of

hybrid wind-wave energy resource for the NW Coast of Iberian Peninsula in a climate change context. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7395.

34 Ribeiro A S, de Castro M, Costoya X, et al. A Delphi method to classify wave energy resource for the 21st century: Application to the NW Iberian Peninsula. Energy, 2021, 235: 121396.

35 钱恒, 张韧. 北极西北航道海洋风能选址建模与评估. 极地研究, 2020, 32(4): 544-554.
Qian H, Zhang R. Modeling and evaluation of ocean wind energy locations in the arctic northwest passage. Chinese Journal of Polar Research, 2020, 32(4): 544-554. (in Chinese)

36 Zhang S J, Wei J, Chen X, et al. China in global wind power development role, status and impact. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109881.

37 Tian Y C, Kou L, Han Y D, et al. Evaluation of offshore wind power in the China sea. Energy Exploration & Exploitation, 2021, 39(5): 1803-1816.

38 Dai J C, Tan Y Y, Shen X B. Investigation of energy output in mountain wind farm using multiple-units SCADA data. Applied Energy, 2019, 239: 225–238.

39 周春霞. 21世纪海上丝绸之路建设的研究现状和趋势展望——基于中国知网CNKI上550篇论文的统计分析. 社科纵横, 2017, 32(2): 87-94.
Zhou C X. Research status and trend outlook of the construction of the 21st century Maritime Silk Road. Social Sciences Review, 2017, 32(2): 87-94. (in Chinese)

40 Zheng C W. Global oceanic wave energy resource dataset—With the Maritime Silk Road as a case study. Renewable Energy, 2021, 169: 843-854.

41 郑崇伟. “21世纪海上丝绸之路”风能资源时空特征数据集. 中国科学数据, 2020, 5(4): 102-115.
Zheng C W. Temporal-spatial characteristics dataset of offshore wind energy resource for the 21st Century Maritime Silk Road. China Scientific Data, 2020, 5(4): 102-115. (in Chinese)

Research on Offshore Wind Energy Classification: Bottlenecks and Countermeasures

ZHENG Chongwei[1,2] LI Chongyin[2*]

(1 Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;
2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Offshore wind energy resource is a key support for the “carbon peak and carbon neutrality”. However, offshore wind energy development still faces the international bottleneck of reasonable energy classification, which is urgently needed in the overall arrangement and accurate site selection. Firstly, this study systematically reviewed the research progress of offshore wind energy classification scheme at home and abroad, and analyzed the six aspects that need to be improved in the traditional energy classification scheme: without comprehensive consideration of resource characteristics, environmental risks and cost-effectiveness, without significant regional difference of energy classification, unable to meet the needs of diversified tasks, not applicable in some months, insufficient estimation of future energy classification, inconsistent with the mechanism. To deal with the above difficulties, the concept of wind energy classification which is all-factor, all-time, all-sea, and dynamic and adaptive is proposed. And it is also necessary to draw a dynamic map of wind energy classification, to solve the problems of overall strategic layout, accurate site selection, and long-term scientific planning for resource development, to accelerate the industrialization, scale, and independent high-quality construction, thus to contribute to the “carbon peak and carbon neutrality”.

Keywords carbon peak and carbon neutrality, offshore wind energy, energy classification, overall strategic layout, accurate site selection

*Corresponding author

郑崇伟 海军大连舰艇学院副教授。主要研究领域：海洋新能源评估、物理海洋、全球气候变化等。
E-mail: chinaoceanzcw@sina.cn

ZHENG Chongwei Associate Professor of Dalian Naval Academy. His research focuses on marine renewable energy evaluation, physical oceanography, global climate change, etc. E-mail: chinaoceanzcw@sina.cn

李崇银 中国科学院院士，中国科学院大气物理研究所研究员。主要研究领域：气候动力学和海气相互作用。
E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

LI Chongyin Academician of Chinese Academy of Sciences, Professor of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. His research focuses on climate dynamics and air-sea interaction. E-mail: lcy@lasg.iap.ac.cn

■责任编辑：文彦杰